
Електродинаміка. Пристрої НВЧ діапазону. Антенна техніка

УДК 621.396.67

РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕТЛЕВЫХ ПЛАЗМЕННЫХ АНТЕНН

*Овсяников В. В., д.т.н., профессор; Кашуба И. В., студент
Национальный горный университет, г. Днепропетровск, Украина*

RADIO TECHNICAL CHARACTERISTICS OF LOOP PLASMA ANTENNAS

*Ovsyanikov V. V., Doctor of Science (Technics), Professor; Kashuba I. V., Student
National Mining University, Dnipropetrovsk, Ukraine*

Введение

В настоящее время применение плазмы как четвертого состояния вещества во многих областях науки и техники привлекает к себе внимание многих исследователей и разработчиков. Предложение по применению ионизированных лучей для обеспечения радиосвязи было высказано еще в начале XX века [1] и с тех пор в различных странах продолжают исследования и разработка плазменных антенн (ПА) на основе холодной плазмы газового разряда и СВЧ разряда. В 2003 г. в США вышла статья [2] с обзором последних достижений по созданию плазменных антенн, включающих нейтральные газы и пары ртути. В 2011 г. там же вышла книга по разработке и исследованию новых ПА [3]. В работе [4] приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований входных сопротивлений и диаграмм направленности ПА с примесью паров ртути на основе газоразрядной лампы типа ЛБУ-30 в частотном диапазоне 50-500 МГц.

Интерес к ПА можно объяснить такими важными свойствами ПА по сравнению с металлическими и диэлектрическими антеннами как способность исчезать из поля зрения радиолокационных и других средств, способность изменять свои внутренние параметры (подобно «хамелеону»), широкополосность, уменьшенная масса и др. Также на основе ПА можно создавать сложные и многофункциональные реконфигурируемые антенны.

На сегодняшний день не полностью изучены радиотехнические характеристики (РТ) ПА особенно с учетом внесения в состав плазмы дополнительных примесей, например, добавок ртути, что практикуется многими исследователями и разработчиками ПА, например, [2, 3]. По мнению авторов данной работы, добавление паров ртути в ПА нежелательно, так как ухудшает экологическую обстановку.

В данной работе исследовано влияние удельной проводимости (УП) и относительной диэлектрической проницаемости (ДП) на РТ характеристики ПА, в том числе, с примесями ртути в диапазоне частот 50-500 МГц. Приведены результаты учета влияния паров ртути на удельную проводимость (УП)

петлевой ПА. Затем с учетом этих результатов получены частотные характеристики коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН) и коэффициента полезного действия (КПД) исследуемых антенн.

Основные параметры холодной плазмы газового разряда, применяемой при создании ПА

Упрощенная конструкция ПА представляет собой герметичный трубчатый диэлектрический сосуд низкого давления, наполненный нейтральным газом типа аргона, неона, ксенона и т.п. с примесями, доведенный до состояния ионизации внутреннего содержимого сосуда. Конфигурация и размеры сосуда выполняются в виде аналогов обычных металлических или диэлектрических стержневых или петлевых антенн. Для получения газового разряда в ПА к запаянным металлическими контактами торцам трубки подводится разность потенциалов от источника электропитания как в обычной газоразрядной лампе. Плазма, заполняющая ПА представляет собой ионизованный газ, состоящий из большого числа положительно и отрицательно заряженных частиц, а в ряде случаев также из нейтральных атомов и молекул.

Рассмотрим основные параметры плазмы, влияющие на РТ характеристики ПА, такие как плотность заряженных частиц, температуру плазмы, электронную плазменную частоту, электронный дебаевский радиус, а также удельную проводимость и относительную диэлектрическую проницаемость плазмы исходя из простых молекулярно-кинетических представлений. При исследовании ПА, прежде всего, необходимо знать концентрацию (плотность) в единице объема частиц разного сорта N_α , где индекс α означает сорт частиц. Это электроны, ионы, атомы, молекулы и др. Все величины, относящиеся к электронам плазмы, будем обозначать индексом e , а к ионам (дыркам) — индексом i , к нейтральным частицам — индексом n . Частицы, образующие плазму, находятся в состоянии хаотического теплового движения. Для характеристики этого движения вводят понятие температуры T плазмы в целом или T_α для отдельных ее частиц. Температуру плазмы вводят в предположении, что плазма в целом находится в состоянии термодинамического равновесия, а функции распределения частиц всех сортов по импульсам (скоростям) являются максвелловскими с одной и той же температурой T , в этом случае плазму называют изотермической. Плазму газового разряда в противоположность термоядерной часто называют низкотемпературной [5]. Ее «электронная температура» T_e определяется из условия, что произведение $1,5 (\chi T_e)$ равно средней энергии хаотического движения электронов, где $\chi = 1,38 \cdot 10^{-16}$ эрг/град — постоянная Больцмана. Обычно T_e ПА не превышает $10^4 - 10^5$ К, а концентрация заряженных частиц $N_e \approx N_i \approx 10^8 - 10^{15} \text{ см}^{-3}$, причем такая плазма практически всегда слабоионизованная. В случае, когда в плазме имеются однократно ионизованные ионы только одного сорта, это

условие записывается в виде $N_e \approx N_i$, так как заряд электрона $e = -e_i$. Пусть какой-либо электрон плазмы отклонился от своего первоначального равновесного положения в плазме. При этом возникает возвращающая сила, по порядку величины равная средней силе взаимодействия частиц, то есть $F \approx e^2 / r_{cp}^2$ где e — заряд электронов равный $4,8 \cdot 10^{-10}$ СГСЕ, r_{cp} — среднее расстояние между частицами. В результате электрон начнет колебаться около равновесного положения с частотой:

$$\omega_{Le} = \sqrt{\frac{4\pi e^2 N_e}{m_e}}, \quad (1)$$

которая называется электронной ленгмюровской, электронной плазменной или просто плазменной частотой, где масса электрона $m_e = 9,1 \cdot 10^{-28}$ г.

Естественно принять за временной масштаб разделения зарядов величину, обратную электронной ленгмюровской частоте. Пространственный масштаб разделения зарядов определяться длиной, на которую может сместиться возмущение плотности заряженных частиц вследствие их теплового движения за время, равное периоду плазменных колебаний. Таким образом, пространственный масштаб разделения зарядов для невырожденной плазмы определяется по формуле (2) и называется электронным дебаевским радиусом.

$$r_{De} = \sqrt{\frac{\chi T_e}{4\pi e^2 N_e}}. \quad (2)$$

Чтобы ПА фактически представляла собой плазму, ее продольные и поперечные размеры должны превышать этот параметр [5, 6]. Такое условие было выполнено при создании конструкции исследуемой антенны.

Удельную проводимость (УП) ПА определяем по формуле работы [6]. Однако при этом дополняем значение УП слагаемым, учитывающим пары ртути следующим образом

$$\sigma_{PA} = \sigma_G + \sigma^{PA}_{Hg}, \quad (3)$$

где: σ_{PA} — суммарное значение УП ПА с учетом паров ртути; σ_G — УП плазмы по формулам работы [6]; σ^{PA}_{Hg} — УП паров ртути, наполняющих ПА.

С учетом выражения (3) расчет суммарного значения УП ПА (σ_{PA} , в См/м) для случая наличия в ПА паров ртути выполняем по формуле:

$$\sigma_{PA} = 1,11 \cdot 10^{-10} \frac{e_e^2 N_e \nu_{ef}}{m_e \cdot (\omega^2 + \nu_{ef}^2)} + \frac{4 \sigma_{Hg} m}{\pi \varphi_{Hg} P d^2}, \quad (4)$$

где e_e — заряд электрона $4,80 \cdot 10^{-10}$ СГСЕ; ω — круговая рабочая частота; ν_{ef} — эффективное число столкновений частиц за секунду. Во втором слагаемом в (4) — σ_{Hg} — проводимость ртути $1,04 \cdot 10^6$ См/м; m — масса ртути, вво-

димой в данную ПА; ρ_{Hg} — плотность ртути $1,36 \cdot 10^4$ кг/м³, P , d — периметр (общая длина трубки) петли и диаметр трубки ПА.

Относительную диэлектрическую проницаемость находим по следующей формуле работы [6].

$$\varepsilon_G = 1 - \frac{4 \cdot \pi \cdot e_e^2 \cdot N_e}{m_e \cdot (\omega^2 + \nu_{ef}^2)} \quad (5)$$

Расчет основных параметров плазмы газового разряда исследуемых ПА

На рис. 1 приведен внешний вид исследуемой петлевой несимметричной антенны, выполненной из плазмы.

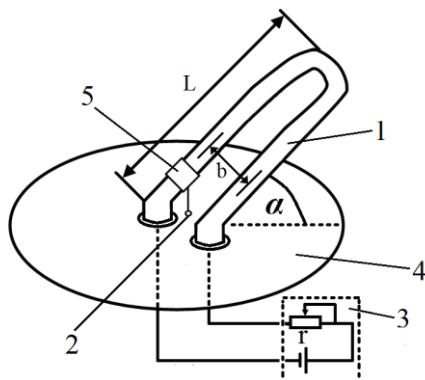
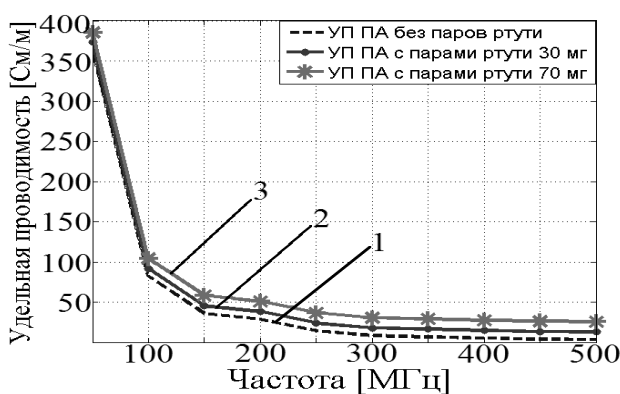
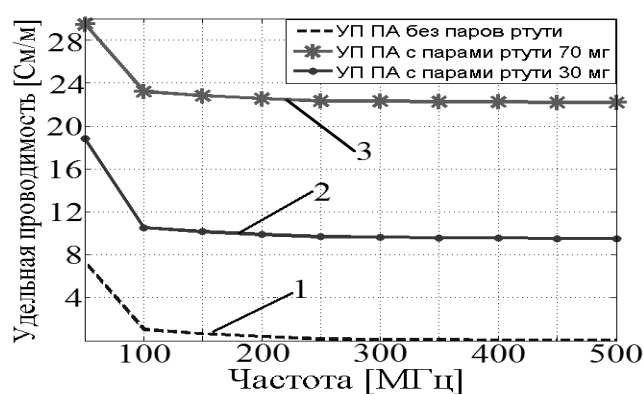


Рис. 1. Конфигурация исследуемых петлевых антенн: 1 — петлевая антенна, 2 — порт СВЧ возбуждения, 3 — источник формирования газового разряда в трубке, 4 — металлический диск, 5 — узел возбуждения СВЧ сигнала в ПА

На рис. 2, а, б приведены результаты расчетов УП по формуле (4) в частотном диапазоне 50-500 МГц, $f_{cp} = 250$ МГц, $\lambda_{cp} = 1,2$ м для ПА (рис. 1). Исходные данные для расчёта: длина антенны $L = 455$ мм, $P = 940$ мм, ширина петли от осей трубок $b = 56$ мм, диаметр трубки $d_1 = 26$ мм, диаметр отверстия на металлическом диске для изолированного ввода трубок $d_2 = 30$ мм. Внутренний диаметр кольца возбуждения $d_3 = 30$ мм, внешний диаметр кольца возбуждения $d_4 = 36$ мм, масса паров ртути $m_1 = 30$ мг, $m_2 = 70$ мг, плотность заряженных частиц $N_e = 10^{12}$ см⁻³, $N_e = 10^{13}$ см⁻³, α — угол на-



а)



б)

Рис. 2. Графики зависимости УП холодной плазмы от частоты в исследуемом диапазоне частот при эффективной концентрации заряженных частиц $N_e = 10^{13}$ см⁻³ Рис. 2, а. и $N_e = 10^{12}$ см⁻³ Рис. 2, б в ПА с учетом и без учета паров: 1 — без примесей паров ртути, 2 — с примесями паров ртути 30 мг, 3 — с примесями паров ртути 70 мг

клона плоскости петли 1 к плоскости диска 4.

Как видно из рис. 2, а, б наличие паров ртути в ПА для $N_e = 10^{12}$ см⁻³ и $N_e = 10^{13}$ см⁻³ (кривые 1, 2 и 3) приводит к росту суммарного значения ее УП

σ_{PA} , которое, однако, с увеличением частоты несколько снижается.

На рис. 3, а, б приведены результаты расчетов ДП для ПА (рис. 1) по формуле (5) в том же частотном диапазоне 50-500 МГц. Как видно из представленных расчетных графиков во всем исследуемом частотном диапазоне значения относительной ДП очень велики и отрицательны и с ростом частоты уменьшаются по абсолютному значению, но не достигают нуля. Для холодной плазмы этот факт известен давно [2, 5, 6]. Влияние наличия паров ртути в ПА на ее ДП в данной статье не исследовалось.

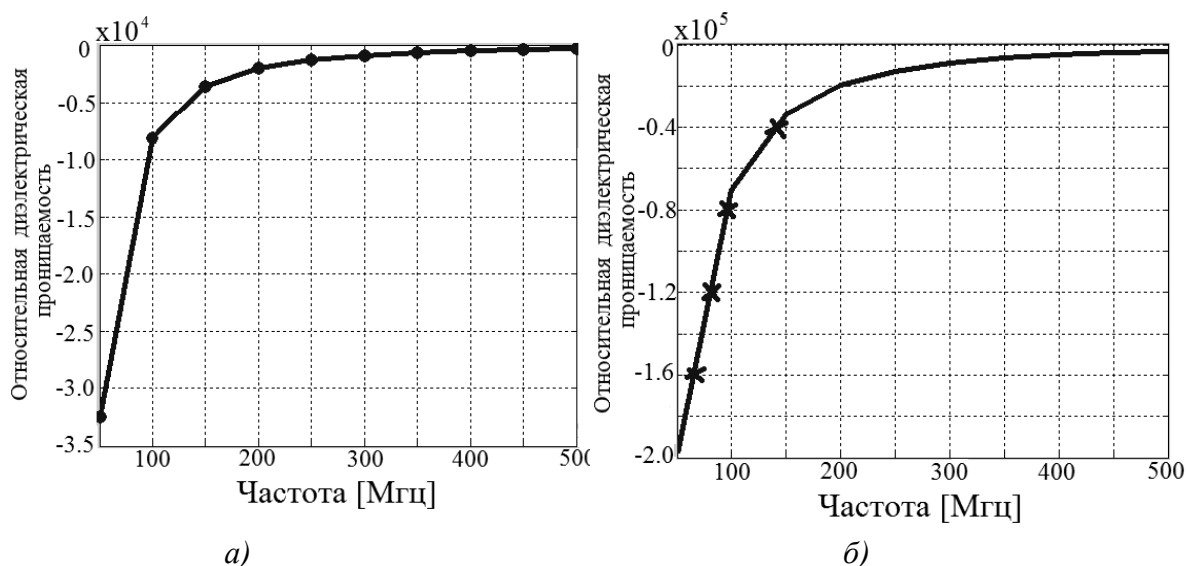


Рис. 3. Графики зависимости ДП холодной плазмы от частоты в исследуемом диапазоне частот при эффективной концентрации заряженных частиц $N_e=10^{12} \text{ см}^{-3}$ (а) и $N_e=10^{13} \text{ см}^{-3}$ (б)

Радиотехнические параметры ПА газового разряда с парами и без паров ртути

Полученные выше данные по УП и ДП ПА при расчете по формулам (4) и (5) были использованы для при исследовании РТ параметров ПА (рис. 1) в программной среде ФЕКО при $\alpha=90^\circ$. Были получены частотные зависимости КСВН и КПД исследуемых антенн.

Исследовано 2 варианта одной и той же конфигурации антенны, установленной на металлическом диске (рис. 1) диаметром $\Phi = 0,5 \text{ м}$ с различными параметрами трубки антенны:

1 вариант: антенна из холодной плазмы с удельной проводимостью σ_G и относительной диэлектрической проницаемостью ϵ_G , рассчитанными по формулам работы [6] (без паров ртути);

2 вариант: антенна из плазмы с парами ртути с суммарной проводимостью плазмы и паров ртути (σ_{PA}), рассчитанной по формуле (4), масса вводимых паров ртути — 70 мг и 30 мг и ϵ_G , полученной по формуле (5).

На рис. 4,а приведены частотные зависимости КСВН плазменных антенн в исследуемом диапазоне частот при $N_e=10^{12} \text{ см}^{-3}$, $L=0,455 \text{ м} = 0,38\lambda_{cp}$.

При цьому РТ характеристики ПА з урахуванням наявності парів ртуті визначаються шляхом задання в програму ФЕКО частотної залежності УП і ДП в відповідності з рис. 2, рис. 3. Як видно з графіка (рис. 4,а) для двох варіантів розглянутих антен при значеннях L/λ близьких до 0,30–0,50 L/λ в відносно широкому частотному діапазоні мають місце сприятливі значення $K_{CBH} \leq 3$.

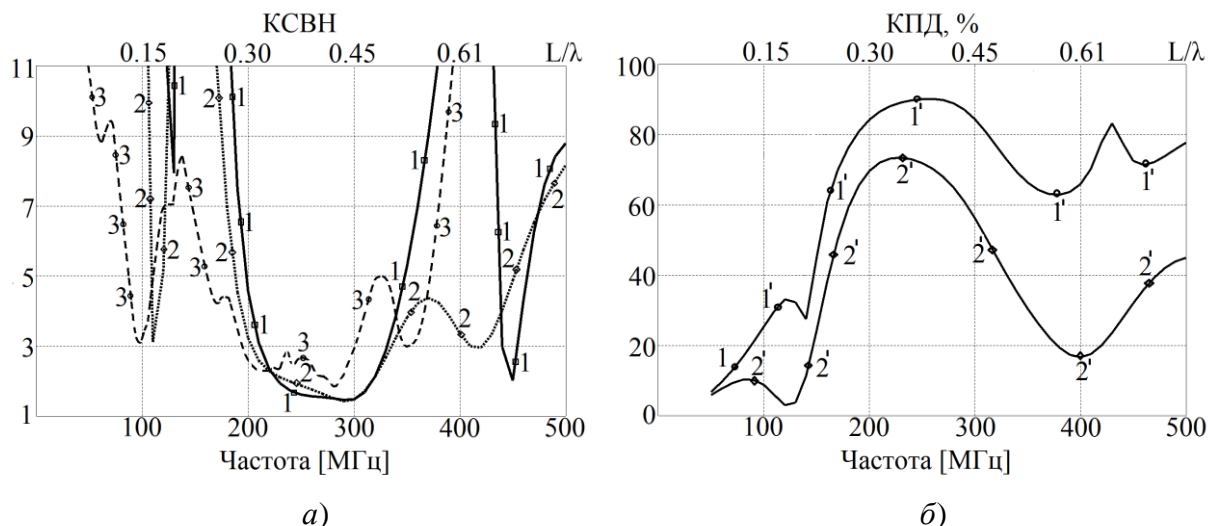


Рис. 4. Розрахункові та експериментальні графіки залежності КСВН (рис. 4,а) і КПД (рис. 4,б) від частоти в досліджуваному діапазоні частот: 1, 1' — ПА без урахування парів ртуті; 2, 2' — ПА з урахуванням впливу парів ртуті, 70 мг; 3 — ПА з урахуванням впливу парів ртуті (експериментальна крива) при $\alpha = 90^\circ$.

Експериментальна залежність КСВН, представлена на рис. 4,а (крива 3) збігається з розрахунковим графіком рис. 4,а (крива 2), отриманою в програмній середі ФЕКО.

Частотні залежності КПД (рис. 4,б) свідчать про те, що наявність парів ртуті в ПА (крива 2') призводить до зниження КПД порівняно з ПА (крива 1') без парів ртуті в середньому на 25–30%.

Висновок

1. Предложено и исследован в частотном диапазоне 50–500 МГц метод расчета РТ параметров ПА (КСВН и КПД) с учетом влияния паров ртути, вводимых внутрь ПА, который может быть использован и для других примесей.

2. Рекомендуется для получения приемлемых значений КСВН и КПД ПА и одновременного улучшения экологической обстановки вблизи ПА снижать по возможности объем вводимых паров ртути до значений 30 мг и ниже.

Література

1. Pat. 1309031 USA, Aerial Conductor for Wireless Signaling and Other Purposes / J. Hettinger. — № 172792 ; filing date 04.06.1917 ; date of patent 08.07.1919. — 10 p.
2. Jenn D.C. Plasma antennas: Survey of Techniques and the Current State of the Art / D.C. Jenn ; Naval Postgraduate School. — San Diego, CA, USA, 2003. — 27 p. [\[Publ.\]](#)
3. Anderson T. Plasma Antennas / T. Anderson. — Norwood, Artech House, 2011. — 226 p. — ISBN 978-1-60807-143-2.

4. Овсяников В. В. Широкополосный СВЧ излучатель на основе плазмы газового разряда / В. В. Овсяников // Радиофизика и радиоастрономия. — 2001. — Т. 6. — № 3. — С. 261—267. [Publ.]
5. Александров А. Ф. Основы электродинамики плазмы: Учеб. пособие для вузов / А. Ф. Александров, Л. С. Богданкевич, А. А. Рухадзе; Под ред. А. А. Рухадзе. — М. : Высш. школа, 1978. — 407 с.
6. Гинзбург В. Л. Распространение электромагнитных волн в плазме / В. Л. Гинзбург — М. : Гос. изд. физ.-мат. лит., 1960. — 552 с.

References

1. Hettinger J. (1919) Aerial Conductor for Wireless Signaling and Other Purposes. Patent USA, No 1309031.
2. Jenn D. C. (2003) *Plasma antennas: Survey of Techniques and the Current State of the Art*. San Diego, CA, USA, 27 p. Available at: <http://hdl.handle.net/10945/778>
3. Anderson T. (2011) *Plasma Antennas*. Norwood, Artech House, 226 p.
4. Ovsyanikov V. V. (2001) Broadband Microwave Emitter on a Basis of Gas Discharge Plasma. *Radio physics and radio astronomy*, Vol. 6, No. 3, pp. 261-267 (in Russian). Available at: <http://journal.rian.kharkov.ua/index.php/ra/article/view/885>
5. Aleksandrov A. F., Bogdankevich L. S., Rukhadze A. A. eds. (1978) *Osnovi elektrodinamiki plazmi* [Fundamentals of plasma electrodynamics]. Moscow, Vissh. Shkola Publ., 407 p.
6. Ginzburg V. L. (1960) *Rasprostranenie elektromagnitnikh voln v plasme* [The propagation of electromagnetic waves in a plasma]. Moscow, 552 p.

Овсяніков В. В., Кашуба І. В. **Радіотехнічні характеристики петльових плазмових антен.** Досліджений вплив пари ртуті в частотному діапазоні 50-500 МГц на питому провідність (УП) холодної плазми газового розряду петльової несиметричної ПА. Показано, що при введенні пари ртуті в ПА її провідність зростає. Досліджено два характерні варіанти наповнення ПА ртуттю в кількості 30 мг і 70 мг. З врахуванням отриманих даних по УП в заданому частотному діапазоні виконано комп'ютерне моделювання основних електродинамічних характеристик петльових ПА: КСВН і ККД. Встановлено, що чим більше домішок ртуті в ПА, тим ближче КСВН до одиниці, що є сприятливим чинником, з іншого боку збільшення пари ртуті призводить до зниження ККД ПА в середньому 25-30%, що небажано. Виконано порівняння результатів розрахунку КСВН з результатами експерименту для ПА. Рекомендується, для набуття прийнятних значень КСВН і ККД ПА і поліпшення екологічної обстановки поблизу ПА по можливості знижувати об'єм пари ртуті, що вводиться до значень 30 мг і нижче.

Ключові слова: плазмова антена; провідність та відносна діелектрична проникність холодної плазми; КСВН; ККД

Овсяников В. В., Кашуба И. В. **Радиотехнические характеристики петлевых плазменных антен.** Исследовано влияние паров ртути в частотном диапазоне 50-500 МГц на удельную проводимость (УП) холодной плазмы газового разряда петлевой несимметричной ПА. Показано, что при введении паров ртути в ПА ее проводимость растет. Исследовано два характерных варианта наполнения ПА ртутью в количестве 30 мг и 70 мг. С учетом полученных данных по УП в заданном частотном диапазоне выполнено компьютерное моделирование основных электродинамических характеристик петлевых ПА: КСВН и КПД. Установлено, что чем больше примеси ртути в ПА, тем ближе КСВН к единице, что является благоприятным фактором, с другой стороны увеличение паров ртути приводит к снижению КПД ПА в среднем 25-30% что нежелательно. Выполнено сравнение результатов расчета КСВН с результатом эксперимента для ПА. Рекомендуются

ется, для получения приемлемых значений КСВН и КПД ПА и улучшения экологической обстановки вблизи ПА по возможности снизить объем вводимых паров ртути до значений 30 мг и ниже.

Ключевые слова: плазменная антенна; удельная проводимость; относительная диэлектрическая проницаемость холодной плазмы; КСВН; КПД

Ovsyanikov V. V., Kashuba I. V. **Radio technical characteristics of loop plasma antennas.** Influence of mercury vapors in the frequency range 50-500 MHz on the specific conductivity (SC) of cold plasma of gas discharge by the loopback asymmetrical PA is probed. It is shown that in the injection of mercury vapors in the plasma antenna its conductivity grows. Two characteristic options of filling of the plasma antenna by mercury in number of 30 mg and 70 mg are probed. Taking into account data retrieved on specific conductivity in the frequency range computer simulation of the main electrodynamics characteristics of loopback PA VSWR and efficiency is executed. It is set that the more mercury impurity in the PA, the closer VSWR to 1 that is the advantage factor, on the other hand the increase in vapors of mercury leads to lowering of efficiency of PA on the average 25-30% that is undesirable. Comparing the results of calculation of VSWR as a result of experiment for PA is executed. It is recommended, for obtaining best values of VSWR and efficiency of PA and improving of an ecological situation near PA whenever possible to reduce the volume of entered mercury vapors to values of 30 mg and below.

Keywords: plasma antenna; conductivity and permittivity of cold plasma; mercury; VSWR; efficiency.